# 盐碱地食叶草细根对干旱复水后的响应

郑 旭, 杨志鑫, 郝东梅, 王润润, 李鲁华, 张凤华, 王家平

（石河子大学农学院，新疆 石河子 832000）

**摘 要：** 盐生植物灌溉周期合理制定是对提高干旱区水资源利用效率的关键因素。以食叶草（*Rumex hanus* by.）细根（$d \leq 1$ mm）为研究对象，采用干旱-复水方法，测定复水后不同时间食叶草细根总根长、根尖数、平均根直径，研究根系增长率、死亡量、根寿命和周转率的变化特征，为制定最佳灌溉周期提供参考依据。结果表明：根长和根尖数在复水后7 d增长幅度最大，10~15 d增长幅度减弱。细根增长率（RER）在复水后第4 d达到最大，第10 d出现显著下降（$P<0.05$），在不同土层（0~20 cm和20~40 cm）和根系直径（0~0.5 mm和0.5~1.0 mm）之间均有极显著差异（$P<0.001$）。细根净生产量（NRP）与RER二者均呈现先增长后降低的规律。复水后15 d，0~20 cm土层和20~40 cm土层的细根存活率分别为3.6%和16.9%，0.5~1.0 mm直径的细根存活率高于0~0.5 mm细根。研究表明复水后细根中位寿命在8.09~13.83 d，20~40 cm土层细根寿命显著高于0~20 cm土层（$P<0.05$）。食叶草细根通过增加20~40 cm土层中0.5~1.0 mm细根应对和适应干旱及复水，从而达到生存目的。综合考虑食叶草生长和农业水资源供给情况，在夏季盐碱地食叶草最佳灌溉周期为10 d。

**关键词：** 盐碱土；细根；日增长率；死亡量；周转率；中位寿命

水分是影响作物生长发育的重要因素[1]，也是干旱区盐碱地形成的主要原因[2-3]。作物生长过程中水分供应不足导致植株受到干旱胁迫，产生作物生长受抑、早衰、萎蔫等一系列不可逆的负面效应[4-5]。干旱区经常出现季节性干旱和间歇性干旱，近年来发生频率逐年增加[6]，根系是植物吸收土壤水分、养分的重要器官，对干旱最先响应胁迫[7]。根系研究是揭示植物对干旱环境适应性的关键。但由于植物根系调查困难，干旱胁迫对植物根系生长认识目前还不很明确，干旱胁迫及复水后根系的恢复调控机制研究较少。

植物生长发育高度依赖根系对水分和养分的吸收功能[8]。细根是植物根系中重要的组成部分，作为植物进行物质吸收、能量交换的器官[9]。目前国内外学者认为，细根主要是直径小于2 mm的根系[8,10-11]。由于细根具有重要的功能属性，依据研究目的分为细根分级理论和根序级分级理论，细根分级理论，主要是按照直径大小分级，其优点是操作性强，缺点是方法标准不统一。根序级分级理论，以末端最短最细的根尖作为一级根，生长一级根的母根称为二级根，生长二级根的母根为三级根，其他根级依此类推，其优势是考虑了不同根序级的功能差异，缺点是分级工作费时费力。根序模块理论综合上述两种方法的优点，主要基于功能将细根分成吸收根和运输根[12-13]。Liu等[14]研究分析上述两种方法，研究发现根系吸收功能集中在直径<0.5 mm的根系，运输功能主要是直径>1 mm的根系，而直径0.5~1 mm的根系既有吸收功能也有运输功能。因此，细根生长和发育对植物生长发育和灌溉周期制定具有重要意义。

干旱和复水在自然界中是循序出现的，植物根系的生长发育在干旱-复水过程中存在着明显差异[15]。研究表明，伊犁绢蒿（*Seriphidium transiliense*）在干旱复水后提高了根系活力和渗透调节物质，降低了抗氧化酶的活性，具有更强的抵御干旱胁迫的能力[16]；干旱后复水对燕麦（*Avena sativa*）根系总长、根体积、根系平均根直径等根系指标具有促进作用[17]；研究表明，干旱复水后树木幼苗的细

**收稿日期：** 2021-04-06； **修订日期：** 2021-06-24
**基金项目：** 国家重点研发计划（2016YFC0501406）；石河子大学国际科技合作推进计划项目（GJHZ201906）
**作者简介：** 郑旭（1996-），男，硕士研究生，研究方向为干旱区盐碱地恢复与治理. E-mail: zhengxu960913@163.com
**通讯作者：** 王家平. E-mail: 2006wjp@163.com

根长、根直径、根干重增加，分支强度等根系性状均有增强，从而提高了树木幼苗的存活率[18-19]。目前干旱-复水下植株根系的研究主要聚焦在总根系，对直径小于1 mm的细根研究关注不足，因此，探究干旱胁迫复水对植物细根形态变化、周转和寿命的研究可为盐生植物干旱适应及灌溉周期的制定提供实践依据。

食叶草(*Rumex hanus* by.)是一种高产优质的粮饲作物，具有耐盐碱、耐干旱和耐寒等特点，是盐碱地改良适宜植物[20]。关于食叶草的研究主要集中在食叶草安全性评价和食叶草在食品、饲草和荒漠化土地改良利用等方面[20-21]，食叶草根系在干旱区生长发育动态变化及合理灌溉方面研究尚未开展。本研究以3 a生食叶草为研究对象，阐明干旱区盐碱地食叶草细根生长、死亡和周转对干旱后复水的响应及制定合理灌溉周期，研究结果为干旱区盐碱地耐盐植物根系周转和盐碱地修复治理提供实践依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

试验于2020年4月10日—6月25日在石河子总场五分场(44°36′1.75″N，85°57′35.72″E)进行，试验期间白天平均气温为32.5 ℃，夜晚平均气温为17.1 ℃。小区试验土壤为灰漠土，盐含量0.4%~0.6%，pH值8.3~8.7，为盐碱土。0~20 cm土层土壤有机质为5.6 g·kg$^{-1}$、全氮0.28 g·kg$^{-1}$、全磷0.75 g·kg$^{-1}$、全钾21.2 g·kg$^{-1}$。食叶草于2018年8月5日种植，株距40 cm，行距60 cm。

### 1.2　试验设计

2020年4月10日至6月10日，进行干旱处理，试验设置3个重复，每个小区3.6 m×10 m=36 m$^2$，小区间设有1 m保护行。复水前用CI-600根系监测系统扫描试验植株根系，校验检测区域是否存在直径<1 mm根系。于6月10日进行复水，复水一次，灌水量为150 m$^3$·hm$^{-2}$。

### 1.3　微根管埋设

试验采用微根管技术对食叶草根系生长状况进行研究。于2018年8月在食叶草幼苗期安装CI-600根系监测系统(CID Bio-science，Camas，WA，USA)，使用底部密封的透明塑料根管(与CI-600配套，内径64 mm，长度600 mm)监测食叶草根系生长状态。微根管埋设采用双管法，在植株两侧，与地面呈90°夹角。根管密封的一端插入到土壤中，管子需露出地面10 cm左右，根管距植物5 cm。不监测时盖上黑色塑料盖子以防止其他杂物落入管中，并在外管壁缠绕黑色胶带，以阻止光线透过根管传播而影响食叶草根系生长。

### 1.4　测定方法

在复水后第2 d、4 d、7 d、10 d、15 d用根系监测系统对根系进行监测。使用拉杆送下扫描头，在与扫描头连接的拉杆上，每隔20 cm安装拉杆，使用拉杆将扫描头送至待测量的位置，根据埋设角度计算，得到(0~20 cm、20~40 cm)不同深度根系分布图。每次获取的图片长×宽为21.60 cm×15.60 cm，像素为1200 dpi，以TIFF格式保存在电脑里，利用系统配备的WINRHIZOTRON2015a进行分析。

将最新的图像与前期图像叠加，描述被追踪根的演变并报告新特征和状态：如果已经加长或保持乳白色，则为活根，如果已死亡或呈现明显的腐烂迹象(皱缩、透明、微弱或变黑)，则为死根。为了检查根部的死亡状态，在根管同一位置对后期记录的连续图像进行了分析，以确保死根仍然是黑色，没有发生生长。记录所有图像的根径(mm)、活根和死根长度(cm)以及各新根的形状。

### 1.5　根系特征指标计算

活根长度(Live Length Production，LLP)和死根长度(Dead Length Loss，DLL)是从$t$-1到$t$(其中$t$为根系扫描间隔)时间段活根总长或死根总长(cm·m$^{-2}$)。

$$\mathrm{LLP}_{t-1,t}(\mathrm{DLL}_{t-1,t})=\sum_{n=1}^{N}\frac{l_{n,t}-l_{n,t-1}}{A} \tag{1}$$

式中：$l$为扫描时活(死)根长度(cm)；$n$为根的个数(个)，$n\in[1,N]$；$N$为总活根数或死根数(个)；$A$是扫描图像观察到的土壤面积(m$^2$)；$t$为扫描间隔(d)。

累计活根长度(Cumulative Live Length Production，CLLP)和累计死根长度(Cumulative Dead Length Loss，CDLL)为到$t$时期活根或死根的总长度(cm·m$^{-2}$)。

$$\mathrm{CLLP}_T(\mathrm{CDLL}_T)=\sum_{t=1}^{T}\mathrm{LLP}_{t-1,t}(\mathrm{DLL}_{t-1,t}) \tag{2}$$

细根净生产量(Net Root Production，NRP)时间$t$内累计活根长度减去累计死根长度(cm·m$^{-2}$)，得到

时间$t$内的净根生产量。

$$\mathrm{NRP}_T = \mathrm{CLLP}_T - \mathrm{CDLL}_T \quad (3)$$

累计净根生产量(Cumulative Net Root Production,CNRP)时间$t$内累计活根总长度(cm·m$^{-2}$)。

$$\mathrm{CNRP}_T = \sum_{t=1}^{T} \mathrm{NRP} \quad (4)$$

死根数($DN$)在给定的时间间隔内,计算$t$和$t$–1之间死根的差值。

$$\mathrm{DN}_{t-1,t} = \frac{\mathrm{DN}_t - DN_{t-1}}{A} \quad (5)$$

式中:$\mathrm{DN}_{t-1,t}$为死根数(个·m$^{-2}$);$\mathrm{DN}_t$为扫描$t$时的死根数(个);$A$为扫描图像观察到的土壤面积(m$^2$);$t$,$t$–1为两侧测量的时间间隔(d)。

通过计算$t$–1和$t$时间的根长差来计算单个根系生长,从而确定每个根生长率(Root Elongation Rate,RER)即在时间$t$和$t$–1之间所有根系长度平均值除以相对应的周期。

$$\mathrm{RER}_{t-1,t} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\frac{l_{n,t} - l_{n,t-1}}{P_{t-1,t}} \quad (6)$$

式中:RER是根生长率(cm·d$^{-1}$);$n \in [1, N]$;$N$为总活根数或死根数;$P$为两次采样的时间间隔(d)。以上所有变量对应根直径(0~0.5 mm和0.5~1.0 mm)和土层(0~20 cm和20~40 cm)。

根的存活率($S$)和中位寿命(ML)用非参数Kaplan-Meier方法来确定,在给定时间段内生长的每个细根都相对独立,在研究结束时被分为存活(经过查看还未死亡)或死亡。公式如下:

$$S = \prod_{t<T} \frac{r(t) - d(t)}{t(t)} \quad (7)$$

式中:$S$为存活率(%);$r$为活根数(个);$d$为死根数(个);$T$为整个根系监测时间的周期(d);$t$为测定时间(d)。

根的寿命是根据第一次观察根到死亡的天数(d)[10]。中位寿命(ML)是估计从根出现到死亡之间经过时间的中位数(d),周转率($T$)是中位寿命的倒数,计算公式如下:

$$T = \frac{15}{\mathrm{ML}} \quad (8)$$

### 1.6 数据统计与分析

以RER、NRP和CDLL为因变量,根径和土层深度为自变量,采用广义线性模型(GLM),考虑各因素之间的交互作用,对各因素进行单因素方差分析(ANOVA),用LSD进行差异性检验($P$<0.05)。采用SPSS 21.0软件进行数据处理、统计分析和非参数Kaplan-Meier生存分析,用Origin 8.5软件绘制图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 复水前后食叶草根长、平均根直径、根尖数变化特征

复水后,0~40 cm土层食叶草细根总长与根尖数均明显增加(表1),平均根直径与之相反。根长从1097.9 cm增加到1448.7 cm,增长幅度为24.2%,根尖数由307.1增加到497.9,增长幅度为62.1%,平均根直径由0.74 mm降低到0.41 mm。复水后0~4 d,0~20 cm土层总根增长量略高于20~40 cm土层,但差异不显著($P$=0.12,$P$=0.07),根尖变化趋势与之类似($P$=0.21,$P$=0.08)。复水后0~4 d平均根直径由0.74 mm降低至0.63 mm,此时新生根少,以0.5~1.0 mm根为主。复水后7 d,0~20 cm和20~40 cm土层食叶草根长增幅分别为13.0%、9.7%($P$<0.05),根尖数增幅分别达到17.8%、14.9%,复水后

**表1 不同深度食叶草复水后细根(0~1.0 mm)根长、根尖数、平均根直径的变化特征**

**Tab. 1 Variation characteristics of fine root length (0–1.0 mm), root tip and average root diameter of at different depths after rehydration**

| 复水天数/d | 根长/cm | | | 根尖数/个 | | | 平均根直径/mm | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~40 cm |
| 0 | 473.3±62.6b | 624.6±46.8a | 1097.9±86.3 | 162.3±32.2a | 144.8±33.8a | 307.1±56.2 | 0.86±0.22a | 0.63±0.32b | 0.74±0.24 |
| 2 | 491.0±22.7b | 637.2±33.5a | 1128.2±27.6 | 187.3±21.6a | 152.6±23.9b | 339.9±18.6 | 0.82±0.04a | 0.59±0.21b | 0.71±0.16 |
| 4 | 512.6±37.6b | 672.6±27.3a | 1185.2±26.3 | 212.6±18.6a | 172.6±16.6b | 384.6±15.3 | 0.72±0.16a | 0.54±0.18b | 0.63±0.14 |
| 7 | 573.8±46.3b | 733.6±43.6a | 1307.4±44.2 | 243.6±26.3a | 193.3±22.3b | 436.9±27.3 | 0.53±0.22a | 0.46±0.12a | 0.50±0.23 |
| 10 | 637.4±24.6b | 764.6±30.8a | 1402.0±26.8 | 267.4±17.6a | 208.3±18.6b | 475.7±24.6 | 0.58±0.17a | 0.62±0.07a | 0.60±0.08 |
| 15 | 660.4±33.6b | 788.3±27.6a | 1448.7±30.6 | 281.6±22.6a | 216.3±24.6b | 497.9±20.8 | 0.66±0.22a | 0.64±0.09a | 0.65±0.18 |

注:不同小写字母表示不同土层间差异显著($P$ < 0.05)。下同。

10 d,0~20 cm和20~40 cm土层食叶草根长增幅分别为13.4%、5.0%,根尖数增幅分别达到14.6%、10.4%(表1)。复水后7~15 d平均根直径由0.50 mm增加至0.65 mm,此时新生根占比减少,以0.5~1 mm根为主。

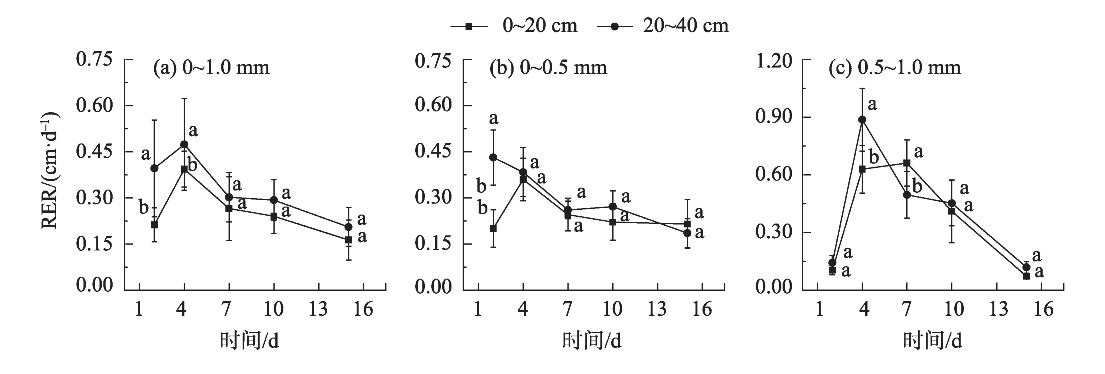
### 2.2 复水后不同深度食叶草根系直径增长率变化特征

由图1a和表2可知,土层深度对RER有极显著性影响($P<0.001$),0~20 cm和20~40 cm土层深度的食叶草根长增长速率总体表现出先增后降的趋势,20~40 cm土层根系增长率明显高于0~20 cm土层。复水0~7 d,0~20 cm土层根系增长波动显著大于20~40 cm,复水7~15 d,0~20 cm土层和20~40 cm土层根系增长趋于一致,说明复水的补偿效应消失。复水2 d,0~20 cm土层和20~40 cm土层食叶草根长增长率分别为0.213 cm·d$^{-1}$、0.396 cm·d$^{-1}$($P=0.026$)。0~20 cm和20~40 cm土层均在复水后4 d达到最大增长速率为0.393 cm·d$^{-1}$、0.474 cm·d$^{-1}$($P=0.043$)。

由图1b和表2可看出,根直径($P<0.001$)对RER有极显著性影响。0~0.5 mm的细根在复水4 d的增长率是最大,为0.647 cm·d$^{-1}$,复水后0~20 cm土层中0~1.0 mm细根表现出先增加后降低,在复水后4 d的增长最高为0.386 cm·d$^{-1}$,之后根系增长速率逐渐降低,20~40 cm土层的根增长率在复水后逐渐降低,在复水后2 d增长率最大为0.463 cm·d$^{-1}$,复水对20~40 cm土层0~0.5 mm细根的补偿效应降低。0.5~1.0 mm细根在不同土层中最大增长速率不同,0~20 cm土层中最大增长速率是在复水后第7 d,为0.664 cm·d$^{-1}$,20~40 cm土层中最大增长速率出现在复水后第4 d,为0.881 cm·d$^{-1}$(图1c)。

### 2.3 复水后食叶草细根净生产量和死亡量变化特征

细根净生产量(NPR)与RER先升高后降低规律相一致(图2a),土壤深度对CNRP具有极显著影响($F=19.44$,$P<0.01$)(表2)。在复水7 d后,0~20 cm土层细根开始出现大量死亡,20~40 cm土层细根在复水后10 d开始大量死亡,可以看出深层细根死亡有一定的滞后。细根死亡的直径主要集中在0~0.5 mm,占死根长度和死根总数的60%以上(表3),复水10 d后0~20 cm土层细根死亡近60%,20~40 cm死亡20%。由图2b可知,0~20 cm的细根死亡量显




注:不同字母表示不同土层间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图1　复水后不同深度食叶草细根增长率(RER)变化特征

Fig. 1　Characteristics of daily growth rate of fine roots at different depths after rehydration

**表2　食叶草细根增长率(RER)、累积净根生产量(CNRP)和累积死根长度(CDLL)与细根直径、土层深度方差分析**

**Tab. 2　ANOVA mode for root elongation rate (RER), cumulative net root production (CNRP) and cumulative dead length loss (CDLL) as function of the fine root diameter soil depth, and interactions between factors**

| | RER | | CNRP | | CDLL | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F$ | $P$ | $F$ | $P$ | $F$ | $P$ |
| 直径 | 79.28 | < 0.001*** | 133.09 | < 0.001*** | 38.31 | < 0.001*** |
| 土层深度 | 7.967 | 0.005** | 36.37 | < 0.001*** | 19.44 | < 0.001*** |
| 直径×土层深度 | 0.543 | 0.461 | 4.41 | 0.036** | 0.34 | 0.559 |

注:*表示$P<0.05$,**表示$P<0.01$,***表示$P<0.001$。

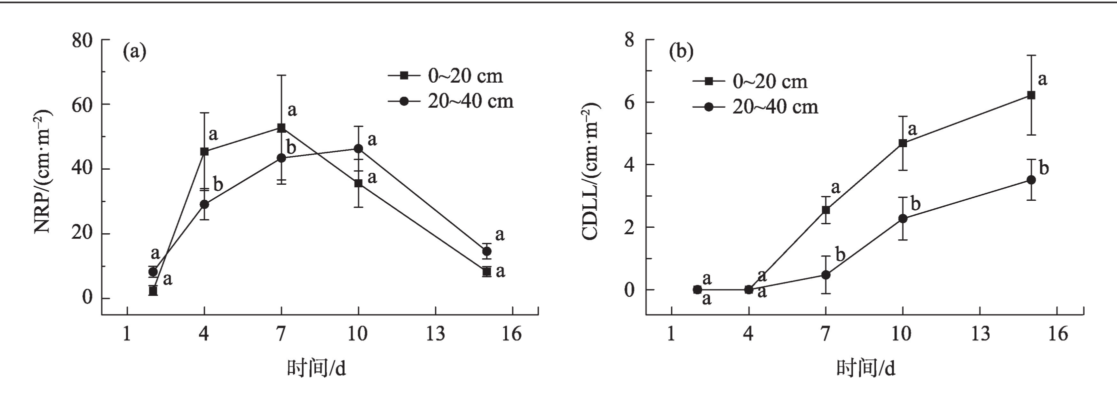



图2 复水后细根净生产量(a)和不同土层累计死根量(b)

Fig. 2 Net production of fine roots (a) and accumulation of dead roots in different soil layers (b) after rehydration

**表3 0~40 cm土层累积活根长度(CLL)和累积死根长度(CDLL)**

**Tab. 3 Cumulative live root length production (CLLP) and cumulative dead length loss (CDLL) in 0−40 cm soil layer**

| 土壤深度/cm | CLLP/(cm·m$^{-2}$) | CDLL/(cm·m$^{-2}$) | 总根长的占比/% | 根死亡率/% | RER/(cm·d$^{-1}$) | 总根数/个 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0~20 | 112.3a | 62.4a | 62.7a | 58.2a | 0.31±0.22a | 99a |
| 20~40 | 106.8a | 24.4b | 37.3b | 22.8b | 0.27±0.32b | 56b |

著大于20~40 cm(*P*<0.05),细根在复水后5 d出现死亡,复水后15 d达到最大,细根的死亡量在0~20 cm和20~40 cm土层分别为6.22 cm·m$^{-2}$和3.51 cm·m$^{-2}$(*P*<0.05)。

### 2.4 复水后不同深度食叶草根直径对根系周转率的影响

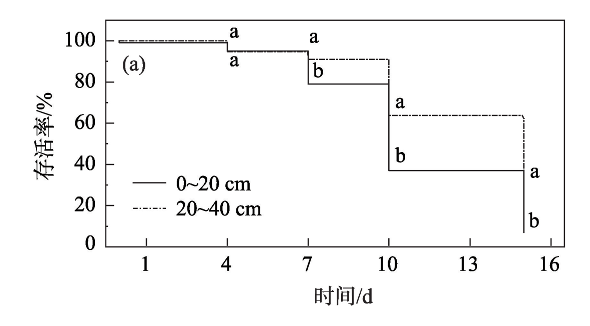
由图3可以看出,不同土层深度和细根直径对食叶草细根的寿命有显著影响(*P*<0.05),根系直径和土层深度对细根累积死根长度(CDLL)有显著的影响(表2)。土层深度对细根的存活率有显著影响(图3a,*P*=0.032)。在复水4 d后,根系生存率大于95%,随时间增加开始出现不同的变化,复水后10 d,20~40 cm土层的细根存活率比0~20 cm高18%。由图3b可知,随着复水天数的增加0.5~1.0 mm的细根存活率比0~0.5 mm高4.6%。多数细根的存活都超过12 d,80%以上的0~1.0 mm细根存活超过10 d,复水15 d,0~0.5 mm和0.5~1.0 mm的细根存活率分为3.6%和16.9%。

由非参数Kaplan-Meier公式得出细根中位寿命与根直径成正比(表4,表5),0~1.0 mm细根中位寿命在9.90~13.83 d,细根的周转率随直径的增加而下降,范围为1.08~1.85(以复水后15 d为一个周期)。由表4可知,0~20 cm土层和20~40 cm土层的细根中位寿命分别为11.41 d和13.83 d,二者之间差异显著(*P*<0.05)。0~0.5 mm和0.5~1.0 mm细根中位寿命分别为9.90 d和11.35 d,二者之间差异显著(*P*<0.05)。

## 3 讨 论

### 3.1 复水对盐碱地食叶草细根系形态的影响

0~1.0 mm细根是植物吸收水分和养分的主要



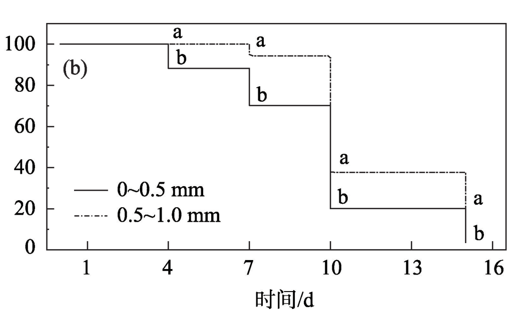




图3 复水后不同土层食叶草根系存活率(a)和不同直径根系存活率(b)

Fig. 3 Survival rate of roots of grass in different soil layers after rehydration (a) and the root survival rate of different diameter (b)

表4　不同土层食叶草根系直径单个根系中位寿命

Tab. 4　Median lifetime of roots system with different soil layers and diameters

| | 直径/mm | | 土层/cm | |
|---|---|---|---|---|
| | 0~0.5 | 0.5~1.0 | 0~20 | 20~40 |
| 中位寿命/d | 9.90±0.27b | 11.35±0.28a | 11.41±0.35b | 13.83±0.33a |
| 周转 | 1.52 | 1.32 | 1.31 | 1.08 |
| 根尖数/个 | 97 | 58 | 99 | 56 |

表5　0~40 cm土层下不同直径根系的中位寿命

Tab. 5　Median lifetime of roots with different diameters under 0−40 cm soil layers

| 土层/cm | 根直径/mm | 中位寿命/d | 周转 | 根尖数/个 |
|---|---|---|---|---|
| 0~20 | 0~0.5 | 8.09±0.33c | 1.85 | 71 |
| | 0.5~1.0 | 10.62±0.50b | 1.41 | 28 |
| 20~40 | 0~0.5 | 11.62±0.39a | 1.29 | 26 |
| | 0.5~1.0 | 12.21±0.39a | 1.23 | 30 |

器官之一,根长、根体积和平均根直径动态变化能够反映植物对干旱胁迫的响应快慢[22],是评价植物抗旱能力的重要指标[23−24]。受到干旱胁迫后复水会对植物产生补偿效应,其中最先表现的部位是根系[9]。本研究结果表明,干旱后复水,根长、根尖数和平均根直径呈现先增加再减小的趋势,根长增长量在复水后第7 d达到最大为40.7 cm,与王晓雪等[17]对干旱后复水燕麦根系生长的研究结果一致,其原因是复水促使根系产生更多的吸收根,说明复水能够恢复植物根系生长。复水后,食叶草的平均根直径减少,这是因为根长和根尖数的增加,降低了根系的平均根直径,促进了根系的生长;这与魏清江等[24]对于干旱复水下柑橘(*Citrus reticulata*)根系直径减少的结论一致。郝树荣等[25]研究表明,在水稻分蘖期干旱胁迫后复水,水稻根长和根尖数增加,表明水稻在分蘖期干旱后复水对水稻根系生长具有一定的补偿效应,这与本研究中复水对食叶草根长和根尖数的影响结果一致。

### 3.2　根系直径和土壤深度对细根增长率的影响

根增长率是衡量植物根系活跃程度的指标之一,根增长率越高说明当下生长环境适宜植物生长[10,26]。研究表明,随着土层深度的增加,细根的增长率会随之减小[10]。本研究发现,20~40 cm的根系生长速率高于0~20 cm土壤生长速率,这与Wang等[18]对干旱复水下红松研究结果不同。其原因可能是本试验选用的是3 a生食叶草,根系生长中心已近由0~20 cm土层转移到20~40 cm土层,而且20~40 cm土层在复水第2 d出现了新生细根,0~20 cm土层在复水第4 d出现新生细根(图4),而Wang选择红松的幼苗,其根系生长中心还位于浅土层。细根在深层土壤的分布显著影响其对水分和养分的吸收[27],大部分细根(主要是0~1.0 mm)分布在表层土壤,但在干旱期深层根系会有较大的波动[9,28]。本研究发现,0.5~1.0 mm细根在20~40 cm土层波动变化显著大于0~20 cm土层,这与Mao等[28]研究自然条件下木荷(*Schima superba*)细根增长的结果一致,表明多年生植物可能通过深土层细根增长变化来响应土壤中水分的变化。

根直径和土壤深度均会影响到细根的增长速率和积累量[10],本研究表明,0~1.0 mm细根主要分

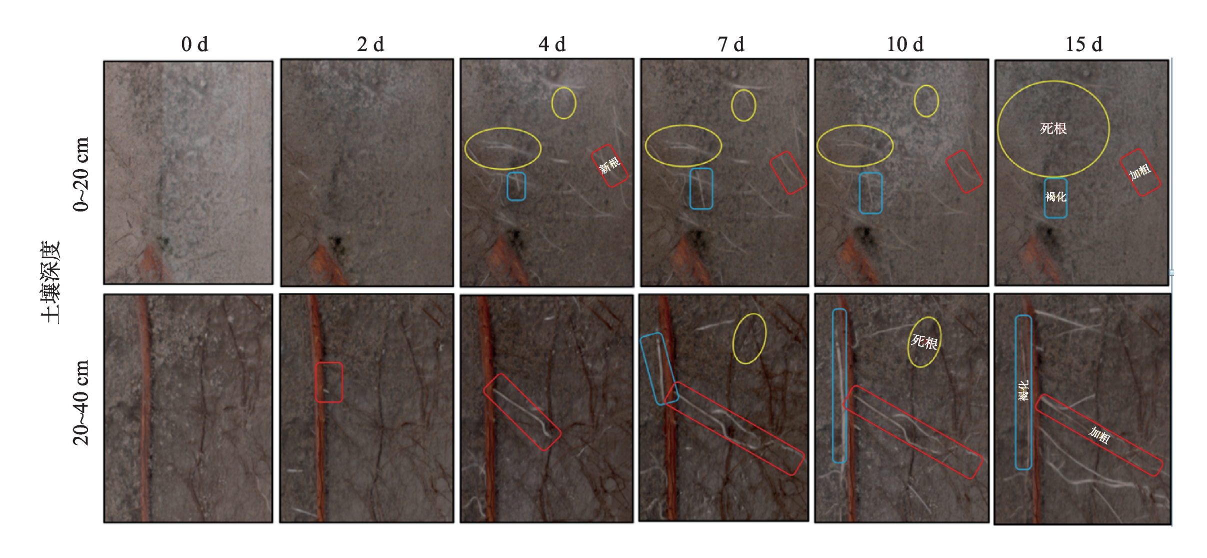



图4　复水后根系形态变化

Fig. 4　Morphological changes of root system after rehydration

布在0~20 cm土层，占监测根系的2/3左右，根直径和土壤深度对细根长度影响显著，这与以往研究结果相似[29]，但在根直径和土壤深度的交互作用中，细根增长率没有显著性差异，这与Germon等[9]研究杂交核桃树(*Juglans regia×nigra* cv. NG23)细根增长对根直径和土壤响应的研究结果一致，表明根系在土壤中先是根长的增长，再是根径的增长，说明土壤对根径的增加具有一定阻碍作用。

### 3.3 土层深度对食叶草根死亡率的影响

细根死亡率随着根直径的增加而降低[30-32]，植物会保留较粗(1~2 mm)的细根，因为其对资源的输送和固定起着重要的作用，并且是0~1.0 mm细根的产生者[33]。不同直径细根，其死亡率也各不相同[34]。粗根与细根相比，碳水化合物含量较高，主要成分是木质素和纤维素[35]，营养元素含量低，其原因是较高的C:N，可以促进细根的生长，提高根系生存能力[36-37]。以生长成本为例，细根的生长成本低，在特殊的情况下(干旱、盐碱)，植物会增加对粗根的投入，从而维持基本的生存[38-39]。

研究发现，复水后5~15 d，0~0.5 mm细根的死亡率显著高于0.5~1.0 mm($P<0.05$)(图3b)，结果与周永姣等[40]研究结果一致，原因可能是前期干旱地上生物量低，光合产物供应不足，无法充足供应这些细根的能量消耗，而且长距离运输需要消耗能量[41]。0~20 cm根系死亡率显著大于20~40 cm($P<0.05$)，可能是表层根系受到的土壤蒸发[27,42]、耕作措施[43]和土壤温度等外界因素，造成根系死亡，这与阳维宗等[8]沼泽草本植物的细根死亡动态变化的研究结果相似。

### 3.4 复水对食叶草细根周转率变化的影响

食叶草的细根周转率在1.08~1.85 (15 d为一个周期)之间，略微高于干旱后复水燕麦的根系周转率(0.63~1.25，14 d为一个周期)[10]，造成这种现象的原因可能是燕麦是一年植物，而食叶草是多年植物，不同植物其根系生长发育方式不同，导致其根系周转率存在差异。本研究表明，0~20 cm土层细根周转率高于20~40 cm土层细根，原因是0~20 cm土层细根生长和死亡比20~40 cm土层更容易受到土壤含水量等因素的影响，造成细根的提前死亡分解，从而提高了根系的周转率，这与阳维宗等[8]在若尔盖高寒草本沼泽的研究结果一致。赵佳宁等[34]通过对全球森林生态系统细根周转规律研究得出森林的细根周转率每年为0.602~1.312，细根周转率随着纬度的升高逐渐降低，因为周转率与根系生长死亡有关，通过10个月的定位数据观察得到食叶草的周转每年在0.89~1.36，且夏季根系周转率显著低于春秋季。

根系动态明显反映土壤中水分变化剧烈，张坤等[44]研究表明，灌水频率对加工番茄0~40 cm土层根系有显著影响，每7 d灌溉一次的频率下根生物量、根系分布、水分利用效率均处于最优。对燕麦、温室黄瓜研究表明，7 d的灌溉间隔促使细根向深土层分布，增加总根系生物量，同时提高产量[18,45]。研究发现食叶草在盐碱地复水10 d后根系增长缓慢、细根系开始出现明显死亡，从盐碱地合理开发利用与水资源节约方面考虑，将灌溉周期设为10 d，既能满足食叶草生长需要，也缓解了水资源紧缺问题。

## 4 结 论

通过研究盐碱地干旱后复水食叶草细根生长发育及衰亡过程，根系存活率动态变化，0~40 cm细根在复水后4~7 d的细根存活率维持在70.6%~93.9%，10 d后出现大幅度下降，到15 d后下降到20.5%。复水后，0~40 cm土层食叶草细根长和根尖数较复水前均增加24.2%和62.1%，表明食叶草在干旱后复水通过增加根系吸水范围从而恢复生长；0~20 cm土层的细根增长量和死亡量比20~40 cm土层高14.8%和35.4%，两者相互抵消，表现出20~40 cm土层周转率、存活量、中位寿命高于0~20 cm土层。0.5~1.0 mm较0~0.5 mm根系的增长率和中位寿命分别高23.6%和14.6%，说明0.5~1 mm根系对外界的适应能力强于0~0.5 mm根系。食叶草根增长量、存活率、累积量均在复水后10 d出现明显降低，分别下降了11.2%、32.6%和18.6%，在10 d后出现了大规模死亡，表明食叶草细根可以维持10 d稳定生长。食叶草细根对复水响应的动态变化，体现了其与环境的适应策略，为干旱区盐生植物的灌溉模式制定提供理论依据。

**参考文献(References)：**

[1] Zhao B, Ma B L, Hu Y, et al. Source-sink adjustment: A mechanistic understanding of the timing and severity of drought stress on photosynthesis and grain yields of two contrasting oat (*Avena sati-*

*va* L. ) genotypes[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(5): 263–276.

[2] Malota M, Mchenga J. Matching soil salinization and cropping systems in communally managed irrigation schemes[J]. Applied Water Science, 2018, 8(1): 14–16.

[3] 龚子同, 陈鸿昭, 杨帆, 等. 中亚干旱区土壤地球化学和环境[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 1–9. [Gong Zitong, Chen Hongzhao, Yang Fan, et al. Pedogeochemistry and environment of aridisol regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 1–9. ]

[4] 厉广辉, 万勇善, 刘风珍, 等. 不同抗旱性花生品种根系形态及生理特性[J]. 作物学报, 2014, 40(3): 531–541. [Li Guanghui, Wan Yongshan, Liu Fengzhen, et al. Morphological and physiological traits of poot in different drought resistant peanut cultivars[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(3): 531–541. ]

[5] 赵丽萍, 刘家勇, 赵培方, 等. 水分胁迫对甘蔗根系及地上部生长的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 10–15. [Zhao Liping, Liu Jiayong, Zhao Peifang, et al. The impact of water stress on the growth of roots and above-ground parts in sugarcane[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(1): 10–15. ]

[6] Daoqian C, Shiwen W, Beibei C, et al. Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6(6): 124–133.

[7] Costa C, Filho A, Crusciol C, et al. Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management[J]. Crop & Pasture Science, 2018, 69(5): 488–506.

[8] 阳维宗, 马骁, 杨文, 等. 若尔盖草本沼泽生物量季节动态、根系周转及碳氮磷储量[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1285–1292. [Yang Weizong, Ma Xiao, Yang Wen, et al. Seasonal dynamics of biomass, root turnover, and carbon, nitrogen and phosphorus storages of Zoige alpine marsh[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(5): 1285–1292. ]

[9] Germon A, Cardinael R, Prieto I, et al. Unexpected phenology and lifespan of shallow and deep fine roots of walnut trees grown in a silvoarable Mediterranean agroforestry system[J]. Plant and Soil, 2016, 401(1): 409–426.

[10] Pregitzer K S, King J S, Burton A J, et al. Responses of tree fine roots to temperature[J]. New Phytologist, 2010, 147(1): 105–115.

[11] Pregitzer K S, Deforest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine north American trees[J]. Ecological Monographs, 2002, 72(2): 293–309.

[12] Mccormack M, Dickie I, Eissenstat D, et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes[J]. New Phytologist, 2015, 207(3): 505–518.

[13] Zadworny M, Eissenstat D M. Contrasting the morphology, anatomy and fungal colonization of new pioneer and fibrous roots[J]. New Phytologist, 2011, 190(1): 213–221.

[14] Liu Y, Wang G, Yu K, et al. A new method to optimize root order classification based on the diameter interval of fine root[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2960–2978.

[15] Li M, Wang Y, Adeli A, et al. Effects of application methods and urea rates on ammonia volatilization, yields and fine root biomass of alfalfa[J]. Field Crops Research, 2018, 218(8): 115–125.

[16] 陈爱萍, 隋晓青, 王玉祥, 等. 干旱胁迫及复水对伊犁绢蒿幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 48–57. [Chen Aiping, Sui Xiaoqing, Wang Yuxiang, et al. Effects of drought and re-watering on growth and physiological characteristics of *Seriphidium transiliense* seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 48–57. ]

[17] 王晓雪, 李越, 张斌, 等. 干旱胁迫及复水对燕麦根系生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(6): 103–111. [Wang Xiaoxue, Li Yue, Zhang Bin, et al. Effects of drought stress and rehydration on root growth and physiological characteristics of oats[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6): 103–111. ]

[18] Wang Cunguo, Brunner Ivano, Guo Wei, et al. Effects of long-term water reduction and nitrogen addition on fine roots and fungal hyphae in a mixed mature *Pinus koraiensis* forest[J]. Plant and Soil, 2021, 16(4): 1–13.

[19] 张萌, 刘宁, 王雪剑, 等. 减少降水和草本竞争对白桦幼苗细根形态和生理特征的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 73–79. [Zhang Meng, Liu Ning, Wang Xuejian, et al. Effects of reduced precipitation and herb competition on the morphological and physiological characteristics of the fine roots of *Betula platyphylla* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 73–79. ]

[20] 楼敏涵, 曲雪峰, 张丽婧, 等. 新食品原料食叶草的安全性评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(10): 3919–3926. [Lou Minhan, Qu Xuefeng, Zhang Lijing, et al. Safety evaluation of edible dock as a new food raw material[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(10): 3919–3926. ]

[21] 周昕, 黄秋连, 王健, 等. 添加乳酸菌剂和糖蜜对不同含水量食叶草青贮发酵品质及体外干物质消失率的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(3): 1594–1606. [Zhou Xin, Huang Qiulian, Wang Jian, et al. Effects of adding lactic acid bacteria and molasses on fermentation quality and in vitro dry matter disappearance rate of *Rumex hanus* by. silage with different moisture Contents[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(3): 1594–1606. ]

[22] Zhang C M, Shi S L, Wang B W, et al. Physiological and biochemical changes in different drought-tolerant alfalfa (*Medicago sativa* L. ) varieties under PEG-induced drought stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(2): 25–40.

[23] Wang W J, He H S, Zu Y G, et al. Addition of HPMA affects seed germination, plant growth and properties of heavy saline-alkali soil in northeastern China: Comparison with other agents and determination of the mechanism[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1): 177–191.

[24] 魏清江, 冯芳芳, 马张正, 等. 干旱复水对柑橘幼苗叶片光合、叶绿素荧光和根系构型的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2485-2492. [Wei Jiangqing, Feng Fangfang, Ma Zhangzheng, et al. Effects of drought and rewatering on leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and root architecture of citrus seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2485-2492. ]

[25] 郝树荣, 郭相平, 王为木, 等. 水稻分蘖期水分胁迫及复水对根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 149-152. [Hao Shurong, Guo Xiangping, Wang Weimu, et al. Effects of water stress in tillering stage and re-watering on rice root growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 149-152. ]

[26] Chen W L, Jin M G, Ferre T P A, et al. Spatial distribution of soil moisture, soil salinity, and root density beneath a cotton field under mulched drip irrigation with brackish and fresh water[J]. Field Crops Research, 2018, 215(7): 207-221.

[27] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al. Evapotranspiration partitioning and water productivity of rainfed maize under contrasting mulching conditions in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243(3): 473-488.

[28] Mao Z, Bonis M L, Rey H, et al. Which processes drive fine root elongation in a natural mountain forest ecosystem?[J]. Plant Ecology & Diversity, 2013, 6(2): 231-243.

[29] 廖逸宁, 郭素娟, 王芳芳, 等. 有机-无机肥配施对板栗园土壤肥力及根系功能性状的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 84-92. [Liao Yining, Guo Sujuan, Wang Fangfang, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and root functional traits in chestnut orchards[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(5): 84-92. ]

[30] Beyer F, Hertel D, Jung K, et al. Competition effects on fine root survival of *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior*[J]. Forest Ecology & Management, 2013, 302(2): 14-22.

[31] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al. Evapotranspiration partitioning and water productivity of rainfed maize under contrasting mulching conditions in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243(3): 473-488.

[32] 吴伊波, 车荣晓, 马双, 等. 高寒草甸植被细根生产和周转的比较研究[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3529-3537. [Wu Yibo, Che Rongxiao, Ma Shuang, et al. Estimation of root production and turnover in an alpine meadow: Comparison of three measurement methods[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3529-3537. ]

[33] Richter D deB, Billings S A. 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone[J]. The New Phytologist, 2015, 27(3): 242-257.

[34] 赵佳宁, 梁韵, 柳莹, 等. 森林生态系统细根周转规律及影响因素[J]. 植物学报, 2020, 55(3): 308-317. [Zhao Jianing, Liang Yun, Liu Ying, et al. Patterns and influence factors of fine root turnover in forest ecosystems[J]. Bulletin of Botany, 2020, 55(3): 308-317. ]

[35] Prieto I, Roumet C, Cardinael R, et al. Root functional parameters along a land-use gradient: Evidence of a community-level economics spectrum[J]. Journal of Ecology, 2015, 103(2): 361-373.

[36] 倪惠菁, 苏文会, 范少辉, 等. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 863-872. [Ni Huijing, Su Wenhui, Fan Shaohui, et al. Responses of forest soil nutrient cycling to nutrient input modes: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 863-872. ]

[37] 胡琪娟, 盛茂银, 殷婕, 等. 西南喀斯特石漠化环境适生植物构树细根、根际土壤化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2020, 44(9): 962-972. [Hu Qijuan, Sheng Maoyin, Yin Jie, et al. Stoichiometric characteristics of fine roots and rhizosphere soil of *Broussonetia papyrifera* adapted to the karst rocky desertification environment in southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(9): 962-972. ]

[38] 王群, 赵向阳, 刘东尧, 等. 淹水弱光复合胁迫对夏玉米根形态结构、生理特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3479-3495. [Wang Qun, Zhao Xiangyang, Liu Dongyao, et al. Root morphological, physiological traits and yield of maize under waterlogging and low light stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(17): 3479-3495. ]

[39] 田小霞, 毛培春, 郭强, 等. 镉胁迫对马蔺根系形态及部分生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(6): 1105-1113. [Tian Xiaoxia, Mao Peichun, Guo Qiang, et al. Effect of cadmium on root morphology and partial physiological indexes of *Iris lacteal* var. *chinensis*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(6): 1105-1113. ]

[40] 周永姣, 王满堂, 王钊颖, 等. 亚热带59个常绿与落叶树种不同根序细根养分及化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4975-4984. [Zhou Yongjiao, Wang Mantang, Wang Zhaoying, et al. Nutrient and ecological stoichiometry of different root order fine roots of 59 evergreen and deciduous tree species in subtropical zone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4975-4984. ]

[41] Keel S G, Campbell C D, Mn H, et al. Allocation of carbon to fine root compounds and their residence times in a boreal forest depend on root size class and season[J]. New Phytologist, 2012, 194(4): 972-981.

[42] Çerçioğlu M, Anderson S H, Udawatta R P, et al. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties[J]. Geoderma, 2019, 343(3): 247-253.

[43] Blanco C H, Shaprio C, Jasa P, et al. No-till and carbon stocks: Is deep soil sampling necessary? Insights from long-term experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 206(6): 883-893.

[44] 张坤, 刁明, 景博, 等. 不同灌水量与灌水频率对加工番茄根系生长和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 83-89. [Zhang Kun, Diao Ming, Jing Bo, et al. Influence of irrigation quota and frequency on root growth and yield of processing tomato[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 83-89. ]

[45] 杨冬艳, 冯海萍, 赵云霞, 等. 日光温室秋冬茬黄瓜结果期灌溉频率对产量及根系分布特征的影响[J]. 节水灌溉, 2020, 298(6): 25−28. [Yang Dongyan, Feng Haiping, Zhao Yunxia, et al. Effects of irrigation frequency on yield and root distribution characteristics of greenhouse autumn-winter planted cucumber[J]. Water Saving Irrigation, 2020, 298(6): 25−28. ]

# Response of *Rumex hanus* by. roots to drought after rehydration

ZHENG Xu, YANG Zhixin, HAO Dongmei, WANG Runrun, Li Luhua, ZHANG Fenghua, WANG Jiaping

(Agricultural College of Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

**Abstract:** The rational formulation of irrigation cycle of halophytes is the key factor to improve the utilization efficiency of water resources in arid areas. Taking the fine root ($d \leqslant 1$ mm) of leafy grass (*Rumex hanus* by.) as the research object, the total root length, root tip number and average root diameter at different times after re-watering were measured by drought and re-watering method, and the changing characteristics of root growth rate, mortality, root life span and turnover rate were studied, so as to provide reference basis for the establishment of the best irrigation cycle. The results showed that the root length and the number of root tips increased the most at 7 days after re-watering, and decreased at 10 to 15 days after re-watering. The fine root growth rate (RER) reached the maximum on the 4th day after re-watering, and decreased significantly on the 10th day ($P<0.001$). There were significant differences among different soil layers (0−20 cm and 20−40 cm) and root diameter (0−0.5 mm and 0.5−1.0 mm) ($P<0.001$). Both fine root net production (NRP) and RER increased at first and then decreased. 15 days after re-watering, the fine root survival rate of fine root in the 20 cm soil layer and 20−40 cm soil layer was 3.6% and 16.9% respectively. The fine root survival rate of 0.5−1.0 mm diameter fine root was higher than that of 0−0.5 mm fine root. The results showed that after re-watering, the life span of fine roots in the soil layer of 20 cm was significantly higher than that in the 0−20 cm soil layer at 8.09~13.83 days ($P<0.05$). The fine root of leafy grass can achieve the purpose of survival by increasing the fine root of 0.5−1.0 mm in 20−40 cm soil layer to cope with and adapt to drought and re-watering. Considering the growth of leaf-eating grass and the supply of agricultural water resources, the best irrigation period of leaf-eating grass in saline-alkali land in summer is 10 days.

**Keywords:** saline soil; fine root; daily growth rate; mortality; turnover rate; median life